

УДК / UDC 528,88

**СБОР И ПУБЛИКАЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ
ДАНЫХ ПО МАГИСТРАЛЬНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СЕТЯМ
РОССИИ НА ПРИМЕРЕ МОСКОВСКОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ**

А.М. Карпачевский^{1*}, Г.С. Титов¹

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

* karpach-am@yandex.ru

**COLLECTION AND PUBLICATION OF SPATIOTEMPORAL DATA ON
THE BACKBONE ELECTRIC NETWORKS OF RUSSIA: CASE STUDY
OF THE MOSCOW POWER SYSTEM**

Andrey M. Karpachevskiy^{1*}, German S. Titov¹

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

* karpach-am@yandex.ru

Keywords. geographical networks, transport geography, satellite images interpretation, map web service, power lines, multi-temporal spatial data, network evolution, power grid.

Abstract. At the moment, there are practically no studies devoted to the spatial evolution of electrical networks. As part of the study, the collection of spatio-temporal information about the backbone electric networks on the territory of the Moscow power system was carried out. Publicly available remote sensing data from cartographic web services were used such as Google Maps and Google Earth, as well as archival images from American Keyhole series satellites. Cartographic web services provide data for the years 2003 - 2021, and archive Keyhole images date back to the 1970s. In addition, we used archival maps, diagrams and documents that allow us to date various sections of the line and features of the development of the network. The paper proposes methods of image interpretation, the structure of the database and describes the technology of their publication on the Internet. All power transmission lines that ever existed were divided into segments with homogeneous characteristics, including the year of commissioning and decommissioning (if any), name of the line, voltage, start and end point names, branch point name (if any). As a result, we received not only structured data, but also the possibility of their automated analysis, including morphology analysis such as branch construction, cut construction or new line construction and dismantling. The main result of the study is available at <https://powerlines.one>.

Ключевые слова. географические сети, география транспорта, дешифрирование космических снимков, картографический веб-сервис, линии электропередач, многовременные пространственные данные, эволюция сетей, электрические сети

Аннотация. Электрические сети как предмет изучения географии транспорта на данный момент плохо освещены в отечественной и зарубежной литературе. С появлением высокодетальных космических снимков появилась возможность их использовать для сбора пространственных данных. Несмотря на попытки автоматизации распознавания ЛЭП на снимках, самый надёжный способ получения информации по-прежнему – визуальное дешифрирование. В рамках исследования проведён сбор пространственно-временной информации о магистральных электрических сетях на территории московской энергосистемы. Были использованы общедоступные данные дистанционного зондирования картографических веб-сервисов, а также архивные снимки с американских спутников Keyhole. В работе приведён пример изменения одного участка сети по снимкам за 1973 и 2018 годы. Сбор данных осуществляется с помощью Google Earth Pro и ArcGIS, анализ данных — скриптами модуля агру, подготовка данных к публикации – скриптами R, публикация данных в виде WMS (Web Map Service) выполняется с помощью QGIS Server. При анализе данные хранятся в базе геоданных ESRI, для публикации переводятся в открытый формат Georackage Основной результат исследования доступен по адресу <https://powerlines.one>.

1 Введение

Электрические сети – это вид географических сетей, который на данный момент плохо изучен как система, обладающая особыми чертами пространственной эволюции. География транспорта уделяет значительное внимание вопросам эволюции автомобильных и железнодорожных сетей (1–4), сети общественного транспорта, чего не скажешь об инфраструктурных сетях. Это может быть связано в первую очередь с длительным периодом закрытости данных, а также отсутствием источников пространственных данных очень высокой детальности. Если ранее для исследователей были доступны лишь топографические, некоторые тематические карты и статистические данные (5), то с появлением в открытом доступе данных космической съёмки сверхвысокого разрешения у нас появилась возможность дешифровать объекты электрических сетей для их дальнейшего географического анализа. Тем не менее, на данный момент исследования эволюции электросетей основаны на схематических данных без географической привязки (6,7), либо без сохранения реальной геометрии сети (8). Первые попытки использовать данные дистанционного зондирования для получения пространственной информации об электрических сетях у нас в стране относятся к началу 2000-х годов (9), но характер таких исследований связан в первую очередь с инвентаризацией объектов для корпоративных нужд.

Были попытки автоматизации распознавания ЛЭП по космическим снимкам сверхвысокого разрешения (10–12), а также по данным в радиодиапазоне (13), в том числе при воздушной радиолокационной съёмке (14). Тем не менее, все эти методы не нашли широкого распространения из-за трудностей с получением и обработкой данных, а также ненадежностью результатов. Отечественные корпоративные ГИС используют данные, в основном, кадастровые и геодезические, что приводит к значительным ошибкам (15). Сбор данных об электрических сетях с целью изучения их географии и эволюции на данный момент встречается в единичных публикациях (16,17).

Неразработанным остаётся вопрос хранения и визуализации пространственных данных об электрических сетях (18,19), которые учитывали их особенности и были бы применимы для хранения пространственно-временных данных, а не только отдельных динамических показателей.

Московская энергосистема – одна из старейших энергосистем не только России, но и всего мира. Первая ЛЭП 70 кВ появилась в 1913 году и связала электростанцию в нынешнем Электрогорске с подстанцией Измайлово в Москве. В 1936 было положено начало развитию сети 220 кВ от Сталиногорской ГРЭС до Москвы. В данном исследовании мы рассматриваем только магистральные сети (напряжением 220 кВ и выше), поэтому эта дата стала начальной. Очевидно, что на данный момент мы наблюдаем как нехватку систематизированных данных для изучения электрических сетей как географической системы, так и технологий хранения и публикации таких данных. Цель исследования – разработка методики сбора пространственно-временных данных об электрических сетях и способов их публикации в виде веб-карты. Промежуточным итогом нашего исследования стал картографический веб-сервис, в котором пользователю доступна визуализация развития сети с 1936 по 2020 год.

2 Материалы и методы

2.1 Использование данных дистанционного зондирования

В первую очередь использовались мозаики высокодетальных космических снимков картографических веб-сервисов за период 2003 – 2021 гг., доступные в том числе через программу Google Earth Pro, а также архивная фотографическая съемка с американских спутников серии Keyhole, доступная на сайте Геологической службы США за период 1971 – 1979 гг. Космические снимки очень высокого и сверхвысокого пространственного разрешения позволяют идентифицировать отдельные опоры воздушных ЛЭП, включая некоторые их ключевые характеристики – типовой проект, тип опоры (анкерная или промежуточная опора), количество цепей, напряжение, приблизительный возраст. Сочетание конкретных видов опор на участке воздушной ЛЭП мы называем видовым составом опор (20). Он позволяет определить время строительства данного участка, а сочетание видовых составов смежных участков даёт представление о последовательности их появления и особенностях исторического развития. На рисунке 1 показан участок сети возле электрической подстанции 500 кВ Чагино на 1973 и 2018 годы. Красные линии соответствуют цепям 220 кВ, а жёлтые – цепям 500 кВ. Опоры распознаются в основном по теням, при этом за счёт сложности исторического развития данного участка сети мы

видим сочетания очень разных по конструкции опор, относящихся к разным историческим периодам.

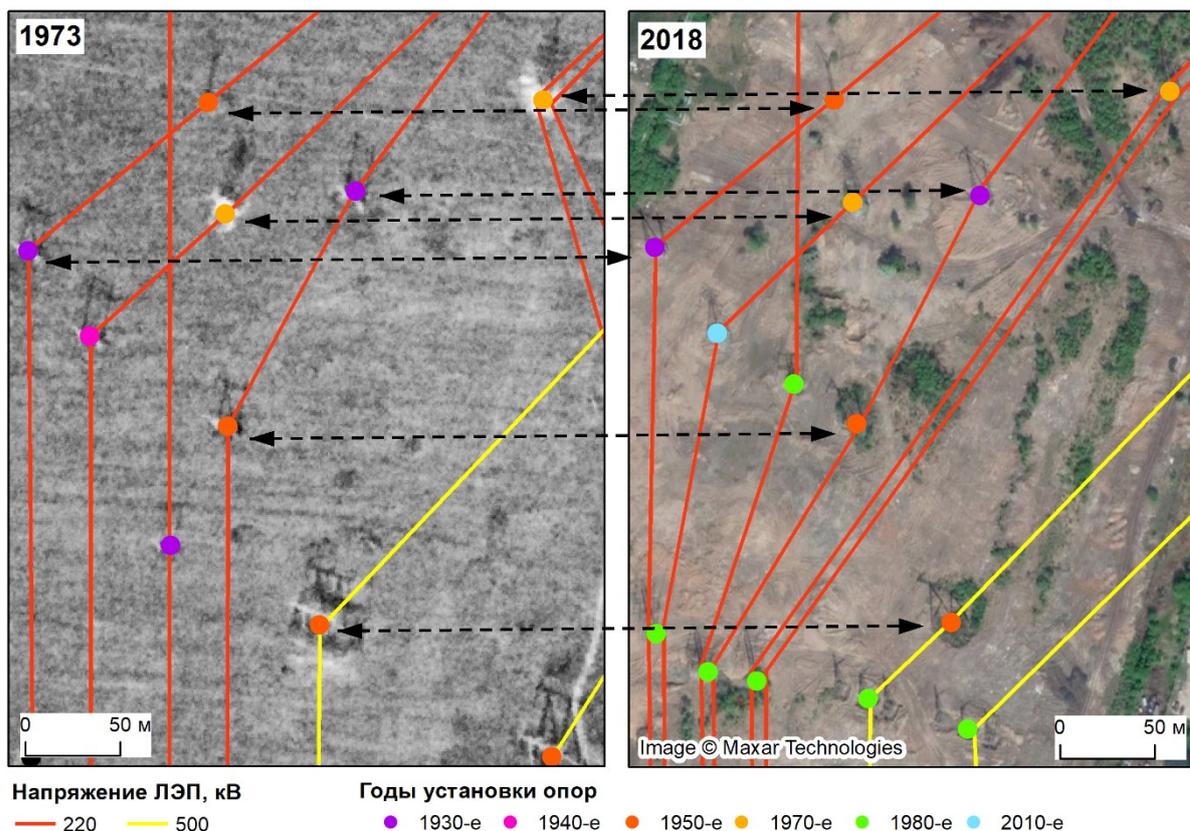


Рис.1. Фрагмент сети ЛЭП, распознанной по мозаике космических снимков в программе Google Earth и по снимку Keyhole; стрелками показаны опоры, которые присутствуют в обоих случаях.

Fig.1. Example of power line interpretation using mosaic of satellite images in Google Earth and Keyhole image; arrows show pylons presented in both cases.

Можно заметить, что на данной территории за обозначенный временной промежуток произошли значительные изменения – все линии, приходящие с юга, были переустроены (вынесены) на запад. По тому, что вынос на современном снимке выполнен на опорах 1980-х годов, можно сделать вывод, что эти изменения произошли именно тогда. Стоит отметить, что при всех этих изменениях количество линий 500 и 220 кВ осталось неизменным. Кроме выноса на данном участке можно заметить одну опору, установленную в 2010-х годах – это результат реконструкции линии, которая была построена в 1949 году.

Большая часть воздушных ЛЭП на текущий момент сохранилась без изменений с момента их строительства, что позволяет с высокой степенью достоверности восстанавливать историческую ретроспективу их развития. Описанный выше пример дешифрирования

позволяет извлечь пространственно-временные данные о состоянии электросетей для всех сложных участков, которые в основном сконцентрированы в Москве возле крупных подстанций и электростанций.

Помимо данных дистанционного зондирования нами использовались топографические карты, а также схемы и программы развития электроэнергетики за разные годы, где публикуются даты ввода в эксплуатацию ЛЭП и электрических подстанций. Не менее полезен интернет-ресурс pastvu.com, где пользователи привязывают к местности и датируют архивные фотографии и кадры из видео. Официальные данные зачастую неполные и содержат множество ошибок, но их совместное использование с космическими снимками, а также данными с pastvu.com позволяют избежать существенных неточностей в публикуемых слоях электросетей за разные годы.

2.1 Обработка и публикация данных

Первичный сбор исходных данных выполнялся на основе базы геоданных ArcGIS. Пространственные объекты, полученные по материалам Google Earth, импортировались в базу геоданных в формате Keyhole Markup Language (KML). Алгоритм импорта написан на Python с применением модуля `agru`. Он включает автоматическую топологизацию пространственных объектов, так как в Google Earth топологию обеспечить невозможно. Пространственные объекты, получаемые по материалам архивной космической съёмки, создаются в базе геоданных в ArcGIS и не требуют дополнительной обработки.

База геоданных включает слои с сегментами ЛЭП и коммутирующими пунктами (конечными пунктами ЛЭП). На каждую ЛЭП приходится два конечных пункта. В слоях для каждой строки приводится геометрическая информация, дата начала и окончания существования и атрибутивная информация. В строке записывается объект с постоянными характеристиками. Изменение характеристик порождает новый объект, следовательно, новую строку.

База геоданных была конвертирована в формат Geopackage алгоритмом на языке программирования R. В базу данных формата Geopackage были записаны два слоя: сегменты ЛЭП и конечные пункты (Рисунок 2). При этом атрибутивная информация отделяется от геометрии. Одной геометрии может соответствовать несколько наборов атрибутов, например, при смене наименования линии.



Рис.2. Сущности базы данных и их отношения.

Fig.2. Database entities and their relationships.

Алгоритмом на языке программирования Python с использованием библиотеки агсру из базы геоданных была сформирована новая база геоданных со слоем модификаций ЛЭП для каждого года. С помощью алгоритма на R, аналогичного предыдущему для конвертации базы геоданных, новый слой записывается Geopackage.

Из данных Geopackage был сформирован проект QGIS с тремя слоями: ЛЭП, классифицированные по напряжениям, модификации участков ЛЭП, коммутирующие пункты, классифицированные по напряжениям. QGIS Server, который размещается на облачном сервере, имеющем статический IP-адрес, публикует слои как WMS с параметром времени. К IP-адресу подключается доменное имя с сертификатом шифрования для публикации по протоколу HTTPS. Общую схему обработки данных показывает рисунок 3.

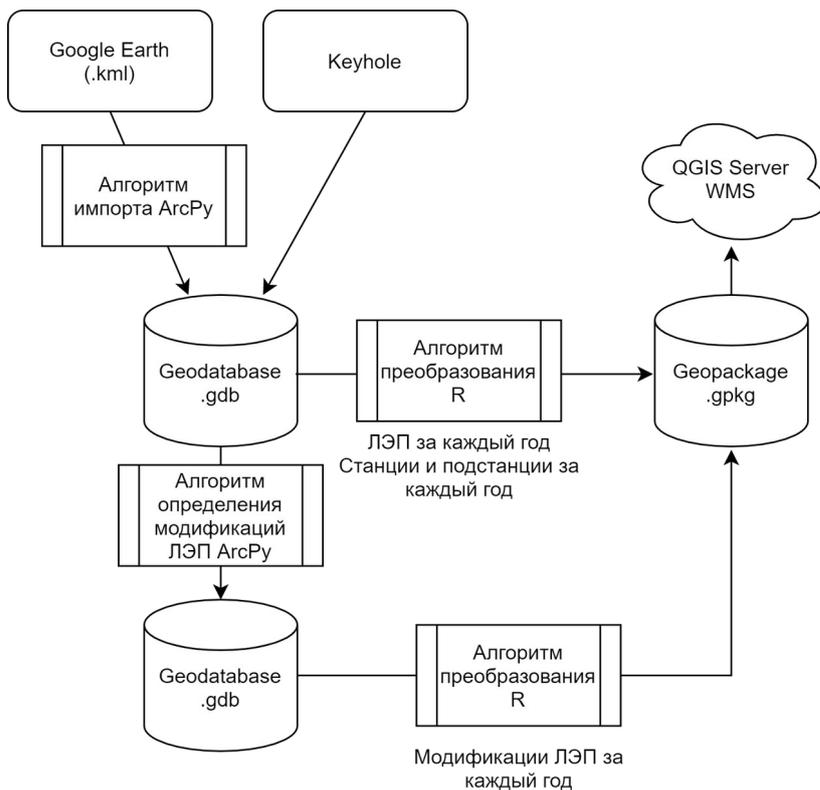


Рис.3. Схема обработки данных.

Fig.3. Data processing scheme.

3 Результаты

Разработанный картографический веб-ресурс доступен по адресу <https://powerlines.one>. В нём пользователю доступна интерактивная временная шкала для отображения состояния сети в определённый год. Кроме того, пользователь может менять режим отображения данных на показ морфологических изменений за каждый год.

В результате дешифрирования современных и архивных космических снимков был получен опыт распознавания различных видов и типов опор, которые соответствуют разным историческим периодам и позволяют проводить датирование участков сети. Так, на территории московской энергосистемы было выявлено более 13 видов опор ЛЭП 500-750 кВ и более 18 видов опор ЛЭП 220 кВ. После сбора сырых данных все линейные объекты были сегментированы на участки, однородные по своей геометрии и времени существования (от строительства до демонтажа).

С учётом того, что для дешифрирования использовались космические снимки за разные сезоны, с разным пространственным разрешением и цветопередачей, стало очевидно, что визуальное распознавание – самый эффективный и надёжный путь получения данных. Чтобы убедиться в этом, пользователи могут самостоятельно сопоставить линейные объекты с мозаикой космических снимков в сервисе. Для выявления участков

однородного видового состава опор можно выбрать режим отображения по морфологии сети (modifications of power lines) за конкретный год – непрерывные участки строительства будут показаны определённым цветом, в зависимости от того, какого типа модификация линии, и, если в последующие годы на этом участке не было реконструкций, то на современных снимках он будет соответствовать оригинальному видовому составу опор. Следует отметить, что все ключевые видовые составы опор были изучены и полевыми методами, что позволяет говорить о верифицированности данных, полученных по космическим снимкам.

4 Обсуждение

Рациональным решением является разделение геометрии и атрибутов объектов в системе хранения. Геометрии объектов при этом не дублируются, что экономит значительный объём памяти. В нашем случае база данных с геометрией, отделённой от атрибутов, занимает чуть меньше 3 Мб против 30 Мб без отделения геометрий.

Схему обработки данных можно значительно упростить, если отказаться от использования ArcGIS в пользу открытого программного обеспечения. Тогда возможно использование одного Georaskage и для сбора, и для публикации данных. Основным затруднением для перехода на данную схему является замена алгоритмов ArcPy.

Ускорение работы картографического веб-сервиса (WMS) и снижение нагрузки на сервер достигается путём кэширования тайлов, например, с помощью MapProxy. Малый объём объём данных на текущем этапе позволяет не заботиться об этом.

Полезным является дополнение картографического веб-ресурса функцией получения данных об объекте по щелчку на него. WMS-сервер предоставляет такую функциональность в виде запроса GetFeatureInfo. Решение данной задачи затруднено ограниченным набором инструментов картографической библиотеки Leaflet. Возможно использование картографической библиотеки OpenLayers, содержащей функцию получения результатов запроса GetFeatureInfo от WMS-сервера, или написанием собственной функции для Leaflet для получения этих данных.

5 Выводы

Данные дистанционного зондирования, доступные за современный период (с 2003 года) и архивные рассекреченные данные с американских спутников серии Keyhole (1970-е) позволяют восстановить историю пространственного развития электросетей с высокой точностью. В ходе исследования были собраны данные по магистральным сетям на территории московской энергосистемы. Результаты были опубликованы в виде картографического веб-сервиса как в виде слоёв состояния сети на каждый год с возможностью интерактивного выбора года. Кроме того, на каждый год доступны слои морфологических изменений сети. Московская энергосистема крайне сложная как по своей существующей структуре, так и по своей пространственной эволюции. В будущем планируется собрать данные по магистральным сетям остальной территории России, а также добавить ряд аналитических инструментов для расчётов сетевых показателей.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации, грант № МК-5343.2021.1.5, а также в рамках государственного задания «Развитие методов и технологий картографии, геоинформатики и аэрокосмического зондирования в исследованиях природы и общества».

Acknowledgements

This research was funded by Council on grants of the President of the Russian Federation, grant number МК-5343.2021.1.5 and also was conducted within the framework of the state-ordered research theme of the Lomonosov Moscow State University, Cartography and Geoinformatics department, no. 121051400061-9 «Development of methods and technologies of cartography, geoinformatics and aerospace sensing in the research of nature and society».

Библиография

- 1 Xie F., Levinson D. Topological evolution of surface transportation networks // *Computers, Environment and Urban Systems*. 2009. Т. 33. № 3. С. 211–223.
- 2 Strano E., Nicosia V., Latora V., Porta S., Barthélemy M. Elementary processes governing the evolution of road networks // *Sci Rep*. 2012. Т. 2. № 1. 296.
- 3 Newman M. E. J. *Networks*. Oxford, United Kingdom ; New York, NY, United States of America: Oxford University Press, 2018. Second edition. 780 с.
- 4 Barthélemy M. Betweenness Centrality // *Morphogenesis of Spatial Networks Lecture Notes in Morphogenesis*. Cham: Springer International Publishing, 2018. С. 51–73.
- 5 Тархов С. А. Эволюционная морфология транспортных сетей. Смоленск: Универсум, 2005. 386 с.
- 6 Buzna L., Issacharoff L., Helbing D. The evolution of the topology of high-voltage electricity networks // *IJCIS*. 2009. Т. 5. № 1/2. 72.

- 7 Liu X., Liu T., Li X. A novel evolving model for power grids // *Sci. China Technol. Sci.* 2010. Т. 53. № 10. С. 2862–2866.
- 8 Makrushin S. Analysis of Russian Power Transmission Grid Structure: Small World Phenomena Detection // *Models, Algorithms, and Technologies for Network Analysis Springer Proceedings in Mathematics & Statistics.* / Ed. V. A. Kalyagin, A. I. Nikolaev, P. M. Pardalos, O. A. Prokopyev. Cham: Springer International Publishing, 2017. С. 107–125.
- 9 Еремченко Е. Н., Кузнецов О. В., Гречищев А. В. Создание топоосновы корпоративной ГИС ОАО «Мосэнерго» и дешифрирование ЛЭП по космоснимкам // 2002. Т. 22. № 3.
- 10 Hafeez K., Aamir M., Afzal S. Automatic extraction of power line towers with the help of image segmentation using a remote sensing data // *International Journal of Future Computer and Communication.* 2012. Т. 1. № 3. С. 289.
- 11 Chen Y., Li Y., Zhang H., Tong L., Cao Y., Xue Z. Automatic power line extraction from high resolution remote sensing imagery based on an improved Radon transform // *Pattern Recognition.* 2016. Т. 49. С. 174–186.
- 12 Wang J., Chen Q., Deng S. Retracted: Analysis of Transmission Line’s Scattering Characteristics in High Resolution Radar Satellite Image // *Geo-Informatics in Resource Management and Sustainable Ecosystem Communications in Computer and Information Science.* / Ed. F. Bian, Y. Xie, X. Cui, Y. Zeng. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. С. 403–417.
- 13 Mu C., Yan Q., Feng Y., Cai J., Yu J. Overview of powerlines extraction and surveillance using remote sensing technology / Ed. H. Maître, H. Sun, B. Lei, J. Feng. Yichang, China: , 2009. 74981M.
- 14 Matikainen L., Lehtomäki M., Ahokas E., Нууппä J., Karjalainen M., Jaakkola A., Kukko A., Heinonen T. Remote sensing methods for power line corridor surveys // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing.* 2016. Т. 119. С. 10–31.
- 15 Карпачевский А. М., Москалев А. В., Викторов В. Н. Классификация и возможные последствия ошибок векторного отображения трасс линий электропередач в геоинформационной системе ФСК // *Энергия единой сети.* 2020. № 3 (52). С. 42–49.
- 16 Шилякина М. Н. Дешифрирование электрических сетей Калининградской области на космических снимках // *Материалы международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых Теория и практика современных географических исследований в рамках XV Большого географического фестиваля.* : Каллиграф М, 2019. С. 611–613.
- 17 Атаев З. А. Топологическое моделирование энергетического пространства Псковской области // *Псковский регионологический журнал.* 2015. № 24.
- 18 Kanjilal V., Schneider M. Modeling and querying spatial networks in databases // *J. Multim. Process. Technol.* 2010. Т. 1. № 3. С. 142–159.
- 19 Fischer M. T. Towards a Survey of Visualization Methods for Power Grids // *arXiv:2106.04661.* 2021.
- 20 Новаковский Б. А., Карпачевский А. М. Электрические сети: картографирование и географический анализ. Москва: Издательство МИИГАиК, 2020. 149 с.

References

- 1 Xie F, Levinson D. Topological evolution of surface transportation networks. *Computers, Environment and Urban Systems.* 2009;33(3):211–23. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0198971508000653>
- 2 Strano E, Nicosia V, Latora V, Porta S, Barthélemy M. Elementary processes governing the evolution of road networks. *Sci Rep.* 2012;2(1):296. Available from: <http://www.nature.com/articles/srep00296>

- 3 Newman MEJ. Networks. Second edition. Oxford, United Kingdom ; New York, NY, United States of America: Oxford University Press; 2018. 780 p.
- 4 Barthelemy M. Betweenness Centrality. In: Morphogenesis of Spatial Networks. Cham: Springer International Publishing; 2018. p. 51–73. (Lecture Notes in Morphogenesis). Available from: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-20565-6_4
- 5 Tarhov SA. Evolyucionnaya morfologiya transportnyh setej. [Evolutionary Morphology of Transport Networks]. Smolensk: Universum; 2005. 336 p. (in Russ.)
- 6 Buzna L, Issacharoff L, Helbing D. The evolution of the topology of high-voltage electricity networks. IJCIS. 2009;5(1/2):72. Available from: <http://www.inderscience.com/link.php?id=22850>
- 7 Liu X, Liu T, Li X. A novel evolving model for power grids. Sci China Technol Sci. 2010;53(10):2862–6. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/s11431-010-4091-4>
- 8 Makrushin S. Analysis of Russian Power Transmission Grid Structure: Small World Phenomena Detection. In: Kalyagin VA, Nikolaev AI, Pardalos PM, Prokopyev OA, editors. Models, Algorithms, and Technologies for Network Analysis. Cham: Springer International Publishing; 2017. p. 107–25. (Springer Proceedings in Mathematics & Statistics; vol. 197). Available from: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-56829-4_9
- 9 Eremchenko EN, Kuznetsov OV, Grechishchev AV. Sozdanie topoosnovy korporativnoi GIS OAO «Mosenergo» i deshifrirovaniye LEP po kosmosnimkam. [Creation of the topographical basis of the corporate GIS of Joint-Stock Company for Power and Electrification Mosenergo and interpretation of power lines on satellite images]. ArcReview. 2002;22(3)
- 10 Hafeez K, Aamir M, Afzal S. Automatic extraction of power line towers with the help of image segmentation using a remote sensing data. International Journal of Future Computer and Communication. 2012;1(3):289.
- 11 Chen Y, Li Y, Zhang H, Tong L, Cao Y, Xue Z. Automatic power line extraction from high resolution remote sensing imagery based on an improved Radon transform. Pattern Recognition. 2016;49:174–86. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0031320315002642>
- 12 Wang J, Chen Q, Deng S. Retracted: Analysis of Transmission Line's Scattering Characteristics in High Resolution Radar Satellite Image. In: Bian F, Xie Y, Cui X, Zeng Y, editors. Geo-Informatics in Resource Management and Sustainable Ecosystem. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2013. p. 403–17. (Communications in Computer and Information Science; vol. 398). Available from: http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-45025-9_40
- 13 Mu C, Yan Q, Feng Y, Cai J, Yu J. Overview of powerlines extraction and surveillance using remote sensing technology. In: Maître H, Sun H, Lei B, Feng J, editors. Yichang, China; 2009. p. 74981M. Available from: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.833688>
- 14 Matikainen L, Lehtomäki M, Ahokas E, Hyyppä J, Karjalainen M, Jaakkola A, et al. Remote sensing methods for power line corridor surveys. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2016;119:10–31. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924271616300697>
- 15 Karpachevskiy AM, Moskalev AV, Viktorov VN. Klassifikatsiya i vozmozhnye posledstviya oshibok vektornogo otobrazheniya trass linii elektroperedach v geoinformatsionnoi sisteme FSK. [Classification and possible consequences of errors in vector mapping of power lines routes in the geoinformation system of the Federal Grid Company]. Energiya edinoy seti. [Unified Grid Energy]. 2020;3(52):42–9. (in Russ.)
- 16 Shilyakina MN. Deshifrirovaniye elektricheskikh setei Kaliningradskoi oblasti na kosmicheskikh snimkakh. [Interpretation of electrical networks of the Kaliningrad region

- on satellite images]. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh Teoriya i praktika sovremennykh geograficheskikh issledovaniy v ramkakh XV Bol'shogo geograficheskogo festivalya. [Proceedings of the international scientific and practical conference of students, PhD students and young scientists Theory and practice of modern geographical research at the XV Great Geographical Festival.]. Kalligraf M; 2019. p. 611–3 (in Russ.)
- 17 Ataev ZA. Topologicheskoe modelirovanie energeticheskogo prostranstva Pskovskoi oblasti. [Topological modeling of the energy space of the Pskov region]. Pskovskii regionologicheskii zhurnal. [Pskov Regionological Journal]. 2015;(24):23–38. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/topologicheskoe-modelirovanie-energeticheskogo-prostranstva-pskovskoy-oblasti> (in Russ.)
 - 18 Kanjilal V, Schneider M. Modeling and querying spatial networks in databases. J Multim Process Technol. 2010;1(3):142–59.
 - 19 Fischer MT. Towards a Survey of Visualization Methods for Power Grids. arXiv:210604661. 2021; Available from: <http://arxiv.org/abs/2106.04661>
 - 20 Novakovskiy BA, Karpachevskiy AM. Elektricheskie seti: kartografirovaniye i geograficheskii analiz [Electrical networks: mapping and geographic analysis]. Moscow: Moskovskii gosudarstvennyi universitet geodezii i kartografii, 2020. 149 p. (in Russ.)